

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-313143

(43) 公開日 平成10年(1998)11月24日

(51) Int. Cl. <sup>6</sup>

識別記号

F I

H01S 3/105

H01S 3/105

3/139

3/139

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全13頁)

(21) 出願番号 特願平9-119631

(22) 出願日 平成9年(1997)5月9日

(71) 出願人 000001236

株式会社小松製作所

東京都港区赤坂二丁目3番6号

(72) 発明者 若林 理

神奈川県平塚市万田1200 株式会社小松製作所研究所内

(72) 発明者 田中 宏和

神奈川県平塚市万田1200 株式会社小松製作所研究所内

(72) 発明者 有我 達也

神奈川県平塚市万田1200 株式会社小松製作所研究所内

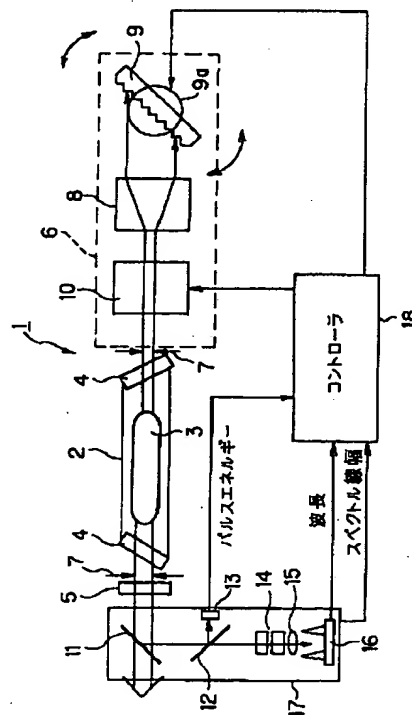
(74) 代理人 弁理士 木村 高久

(54) 【発明の名称】 狭帯域化レーザ装置

(57) 【要約】

【課題】 狭くかつ安定したスペクトル線幅のレーザ光を得ることができる狭帯域化レーザ装置を提供することを目的とする。

【解決手段】 レーザ媒質から発生されたレーザ光を狭帯域化素子によって狭帯域化して出力する狭帯域化モジュールを有する狭帯域化レーザ装置において、入射されたレーザ光の波面を補正して出射する波面補正手段10を前記狭帯域化モジュール6内に備えるようにしている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 レーザ媒質から発生されたレーザ光を狭帯域化素子によって狭帯域化して出力する狭帯域化モジュールを有する狭帯域化レーザ装置において、入射されたレーザ光の波面を補正して出射する波面補正手段を前記狭帯域化モジュール内に備えるようにしたことを特徴とする狭帯域化レーザ装置。

【請求項2】 前記狭帯域化モジュールは、ビームエキスパンダおよび角度分散型波長選択素子を含み、前記波面補正手段は前記レーザ媒質と前記角度分散型波長選択素子の間に配設されることを特徴とする請求項1記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項3】 前記波面補正手段は、凸レンズの機能を有する第1の光学素子と、凹レンズの機能を有する第2の光学素子と、これら第1及び第2の光学素子の相対距離を調整する調整手段と、を有する請求項1記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項4】 前記波面補正手段は、入射されたレーザ光を透過する透過型光学素子と、この透過型光学素子の側面に配設される複数の加熱冷却器と、この加熱冷却器を温度制御して予め設定した所定の屈折率分布になるよう前記透過型光学素子の温度分布を調整する温度制御手段と、を有することを特徴とする請求項1記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項5】 前記波面補正手段は、入射されたレーザ光を反射する反射型光学素子と、この反射型光学素子の反射面を曲げてその凹凸状態を調整する凹凸調整手段と、を有する請求項1記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項6】 前記反射型光学素子は所定の熱膨張率の材料で構成され、前記凹凸調整手段は、反射型光学素子の裏面に配設された1～複数の加熱冷却器と、前記反射型光学素子が予め設定した所定の曲がりになるよう前記1～複数の加熱冷却器を制御する温度制御手段と、を有する請求項5記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項7】 前記凹凸調整手段は、少なくともその一部の支持部材が伸縮自在に構成され、前記反射型光学素子を支持する複数の支持部材と、これら複数の支持部材の各端部を固定する固定部材と、前記反射型光学素子が予め設定した所定の曲がりになるよう前記伸縮自在の支持部材を伸縮制御する伸縮制御手段と、を有する請求項5記載の狭帯域化エキシマレーザ装置。

【請求項8】 前記伸縮自在の支持部材を圧電素子で構成

することを特徴とする請求項7記載の狭帯域化エキシマレーザ装置。

【請求項9】 前記レーザ媒質から発生されたレーザ光をモニタするモニタ手段と、このモニタ手段のモニタ値に基づいて前記波面補正手段による波面補正を制御する制御手段と、を更に具える請求項1記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項10】 前記モニタ手段は、出力レーザ光のショット数を検出するショット数検出手段を有し、前記制御手段は、前記ショット数検出手段の検出値に基づいて前記波面補正手段による波面補正を制御することを特徴とする請求項9記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項11】 前記モニタ手段は、出力レーザ光のスペクトル線幅を検出するスペクトル線幅検出手段を有し、前記制御手段は、前記スペクトル線幅検出手段の検出値に基づいて前記波面補正手段による波面補正を制御することを特徴とする請求項9記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項12】 前記モニタ手段は、出力レーザ光のスペクトル線幅を検出するスペクトル線幅検出手段と、前記出力レーザ光の出力エネルギー値を検出する出力エネルギー検出手段と、を有し、前記制御手段は、前記出力エネルギー検出手段の検出エネルギー値を前記スペクトル線幅検出手段の検出スペクトル線幅で除算する除算手段と、この除算手段の除算値が最大となるように前記波面補正手段による波面補正を制御する波面補正制御手段と、を有する請求項9記載の狭帯域化レーザ装置。

【請求項13】 前記モニタ手段は、前記出力レーザ光の出力エネルギー値を検出する出力エネルギー検出手段を有し、前記制御手段は、前記出力エネルギー検出手段の検出エネルギー値が最大となるように前記波面補正手段による波面補正を制御する波面補正制御手段と、を有する請求項9記載の狭帯域化レーザ装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 この発明は、狭帯域化モジュール内で発生するレーザ光の波面の歪みを補正するようにした狭帯域化レーザ装置に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 半導体装置製造用のステッパの光源としてエキシマレーザの利用が注目されている。これは、エキシマレーザの波長が短いことから光露光の限界0.35μm以下に延ばせる可能性があること、同じ解像度なら従来用いていた水銀ランプのg線やi線に比較して焦点深度が深いこと、レンズの開口径(NA)が小さくて

すみ、露光領域を大きくできること、大きなパワーが得られること等の多くの優れた利点が期待できるからである。

【0003】ところが、このエキシマレーザを半導体露光装置の光源として用いる場合、エキシマレーザの波長（KrFエキシマレーザの波長は248nm、ArFエキシマレーザでは193nm）で製作可能な光学系のレンズの材料としては合成石英素材しかないが（CaF<sub>2</sub>では加工が困難）、合成石英素材単一では色収差の機能を持たせることはできない。

【0004】例えば、KrFエキシマレーザの自然発振光の場合は、スペクトル線幅は300pmと広く、このままでは露光装置のレンズの色収差を無視することはできず、露光結果に充分な解像度を得る事はできない。

【0005】そこで、エキシマレーザを半導体露光装置の光源として用いる場合は、レーザ共振器内にエタロンあるいはグレーティングおよびプリズム等の波長選択素子を配置することによりレーザ光を狭帯域化するようにしている。

【0006】ところで、光共振器内においては、様々な原因によって、レーザ光の波面はダイバージェンス（拡がり）および曲率を有することになる。

【0007】例えば、共振器内にスリットが配置されている場合には、このスリットによる回折によりスリット通過後の光は球面波となる。

【0008】また、共振器内に配置されている光学素子自身の収差によって波面が歪むこともある。例えば、狭帯域化素子として用いられるプリズムエキスパンダのような透過型の光学素子では

(a)内部の屈折率分布が完全に一様ではない

(b)プリズムの研磨面が歪んでいる

などにより、この光学素子を通じたレーザ光の波面は凸面または凹面の曲率を持つものとなる。

【0009】そして、このような曲率を有する波面を持つレーザ光が平坦な形状のグレーティングに入射された場合は、グレーティングによる波長選択性能を低下させてしまうことになる。すなわち、グレーティングへのレーザ光の入射波面が曲率を持つ場合は、グレーティングのそれぞれの溝にレーザ光が異なる角度で入射されることになるので、グレーティングの波長選択特性が低下し、狭帯域化したレーザ光のスペクトル線幅が広くなる。

【0010】そこで、USP-5095492においては、グレーティングに入射するレーザ光の波面に一致するようにグレーティング自体を曲げることにより、上記不具合に対処するようにしていた。

【0011】すなわち、この従来技術における狭帯域化エキシマレーザは、図24に示すように、フロントミラー100、レーザチャンバ101、アパーチャー102、ビームエキスパンダ103、ミラー104およびグ

レーティング105を有し、さらに図25に示すような曲率発生装置によってグレーティング105をグレーティング105への入射波面の曲率に応じて曲げるようにしている。

【0012】図25に示す曲率発生装置は、グレーティング105の両端部をボール106を介してマウント107によって支持し、さらにこれらのマウント107をスプリング108を介して圧力プレート109に連結するとともに、ボルトスクリュー110の一端を圧力プレート109に螺合し、その他端をグレーティング105の中央部裏面に接合されたナット111に螺合するようにしており、ボルトスクリュー110の回転によってグレーティング105の中央部を圧力プレート側に引っ張ることで、グレーティング105に図26に示すような凹面の曲率を発生させるようにしている。

【0013】そして、この従来技術では、レーザ光のスペクトル線幅に応じて適正なグレーティングのテンションを予め設定し、この設定関係に基づきグレーティングのテンションがスペクトル線幅検出センサ112の検出値に対応する設定テンション値になるようにモータ113を駆動制御してボルトスクリューを回転駆動するようにしている。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】上記従来技術では、検出したレーザ光のスペクトル線幅に応じてグレーティング自体を曲げて曲率を持たせるようにしている。

【0015】しかしながら、グレーティングにおいては、レーザ発振波長を所望の波長に制御するために、グレーティングへの入射光の角度を制御する必要があり、このためグレーティングには回転ステージなどの回転機構が備えられ、この回転機構によってグレーティングは図24の矢印Jで示すように回転可能になっている。

【0016】したがって、上記従来装置においては、グレーティングに対し、グレーティングに曲率を発生するための上記曲率発生機構の他に、グレーティングを回転させる回転機構を設置する必要があり、その機構が複雑かつ大型化して実用的ではなく、またグレーティングを回転させるときの振動が上記曲率発生機構に伝わってこの振動によってスペクトル線幅がばらつく可能性がある。

【0017】また、狭帯域化エキシマレーザでは、スペクトル線幅を1pm以下にするために大きなグレーティングを必要とするが、平板のものであっても溝間隔が均一で歪みのない大きなグレーティングを製作することは不可能に近い。まして、上記従来技術では、このような平板グレーティングを曲げようとしているので、上記溝間隔の不均一性や歪みが助長され、適正な波長選択特性が得られなくなる。

【0018】また、上記従来技術では、グレーティング自体を曲げてグレーティングへの入射光の波面収差を補

10

20

30

40

50

正するようにしているので、グレーティング自体に波面収差がある場合はこれを補正することができないという問題もある。

【0019】この発明はこのような実情に鑑みてなされたもので、狭くかつ安定したスペクトル線幅のレーザ光を得ることができる狭帯域化レーザ装置を提供することを目的とする。

【0020】

【課題を解決するための手段及び作用効果】この発明では、レーザ媒質から発生されたレーザ光を狭帯域化素子によって狭帯域化して出力する狭帯域化モジュールを有する狭帯域化レーザ装置において、入射されたレーザ光の波面を補正して出射する波面補正手段を前記狭帯域化モジュール内に備えるようにしている。

【0021】すなわち係る発明によれば、狭帯域化モジュール内にレーザ光の波面を補正して出射する波面補正手段を設けるようにしており、このためこの発明によれば、非常に狭いスペクトルのレーザ光を効率よくかつ安定に出力することができ、また本発明ではグレーティングを波面収差補正のために曲げる機構を有していないために、波長を制御する際にスペクトル線幅を安定させることができる。

【0022】

【発明の実施の形態】以下この発明の実施例を添付図面に従って詳細に説明する。

【0023】図1にこの発明の実施例を示す。

【0024】この図1の実施例において、エキシマレーザ1のレーザチャンバ2は紙面に垂直な方向に陽極および陰極が対向して配設された放電電極3を有し、レーザチャンバ2内に充填されたハロゲンガス、希ガス、パッファガスなどからなるレーザガスを放電電極3間の放電によって励起させてレーザ発振を行う。

【0025】レーザチャンバ2の両レーザ出射口にはウィンドウ4が設けられている。また、レーザチャンバ2とフロントミラー5との間およびレーザチャンバ2と狭帯域化モジュール6との間にはビーム幅を制限するスリット7が設けられている。

【0026】狭帯域化モジュール6は、この場合、ビームエキスパンダ8と角度分散型波長選択素子であるグレーティング9と波面補正器10とで構成されている。この場合、波面補正器10は、ビームエキスパンダ8とレーザチャンバ2との間に設けられており、入射されたレーザ光の波面を補正して出射する機能を有している。この波面補正器10の具体構成については後述する。グレーティング9は回転ステージ9aによって回転自在に構成されている。

【0027】すなわち、この図1の実施例の場合は、フロントミラー5とグレーティング9との間で光共振器が構成されている、レーザチャンバ2で発振されたレーザ光は、狭帯域化モジュール6に入射され、まず波面補正

器10によってその波面が修正された後、ビームエキスパンダ8に入射されてそのビーム幅が拡大される。さらに、レーザ光はグレーティング9に入射されて回折されることにより、所定の波長成分のレーザ光のみが入射光と同じ方向に折り返される。グレーティング9で折り返されたレーザ光は、ビームエキスパンダ8でビーム幅が縮小された後、波面補正器10に入射され、ここでその波面が狭帯域化モジュール6に入射されたときと同じ平面波になるように補正されてレーザチャンバ2に入射される。

【0028】レーザチャンバ2を通過して増幅されたレーザ光は、フロントミラー5を介してその一部が出力光として取り出されると共に、残りが再度レーザチャンバ2に戻って増幅される。

【0029】また、レーザ光の出力側には、部分反射ミラー11、部分反射ミラー12、フォトダイオード13、エタロン14、集光レンズ15およびラインフォトセンサ16などから成るモニタモジュール17が設けられている。

【0030】すなわち、フロントミラー5から出力されたレーザ光の一部は部分反射ミラー11、部分反射ミラー12を経由してフォトダイオード13に入射されてサンプリングされる。モニタモジュール17では、フォトダイオード13の出力から出力レーザ光のパルスエネルギー値を検出し、この検出値をコントローラ18に出力する。

【0031】一方、部分反射ミラー12を透過したレーザ光は、モニタエタロン14、集光レンズ15を経由してラインフォトセンサ16に入射されてサンプリングされる。モニタモジュール17では、ラインフォトセンサ16上に発生した干渉縞の位置から出力レーザ光の波長 $\lambda$ を演算すると共に、干渉縞の幅からスペクトル線幅を演算し、これらをコントローラ18に出力する。

【0032】コントローラ18では、モニタモジュール17からのモニタ信号に基づき放電電極3の放電電圧制御、グレーティング9の回転による波長制御、波面補正器10による波面補正制御等を実行する。

【0033】図2は、コントローラ18で行われる波長制御の手順例を示すもので、コントローラ18は、目標波長 $\lambda_0$ とモニタモジュール17で検出された検出波長 $\lambda$ の差 $\delta\lambda$  ( $=\lambda-\lambda_0$ )を計算し(ステップ200~220)、この波長差 $\delta\lambda$ が零になるような回転ステージ9aの回転角度 $\delta\theta$ を演算し、この回転角度 $\delta\theta$ を含むグレーティング回転信号を回転ステージ9aに出力する(ステップ230~240)。

【0034】この結果、グレーティング9が前記波長差 $\delta\lambda$ が零になる回転位置まで回転駆動される。

【0035】図3は、コントローラ18で行われる波面補正器10の波面制御の一例を示すもので、この場合は、レーザ照射によるコンパクションを考慮した制御を

行うようにしている。

【0036】すなわち、レーザ照射によるコンパクションの発生はレーザのショット数に比例するので、モニタモジュール17のフォトダイオード13によって検出されるパルスエネルギー信号からパルスレーザ光のショット数を演算し(ステップ300)、このショット数に基づいて光学素子のコンパクションによるレーザ光の波面の歪みを演算し(ステップ310)、さらに該演算した波面歪みを補償する波面制御信号を演算し、この波面制御信号を波面補正器10に出力する(ステップ320)。

【0037】図4は、コントローラ18で行われる波面補正器10の他の制御手順を示すもので、この場合はスペクトル線幅が最小となるように波面補正器10を制御するようにしている。

【0038】すなわち、モニタモジュール17のラインフォトセンサ16によって検出されるスペクトル線幅 $\Delta\lambda$ を1パルス毎にモニタし、これらモニタ値を使ってn個のパルス $P_i \sim P_{i+n}$ のスペクトル線幅 $\Delta\lambda_i \sim \Delta\lambda_{i+n}$ の平均値 $\Delta\lambda_{av}$ を順次求める。そして、前回のスペクトル線幅の平均値 $\Delta\lambda_{abj-1}$ と今回のスペクトル線幅の平均値 $\Delta\lambda_{avj}$ を比較する(ステップ400~410)。

【0039】この比較の結果、 $\Delta\lambda_{abj-1} \geq \Delta\lambda_{avj}$ の場合は、前回と同じ方向の波面補正信号を波面補正器10に出力する。すなわち、前回凸面方向に波面を歪める波面補正信号を出力した場合は今回も凸面方向に波面を歪める波面補正信号を出力し、前回凹面方向に波面を歪める波面補正信号を出力した場合は今回も凹面方向に波面を歪める波面補正信号を出力する(ステップ420)。

【0040】一方、 $\Delta\lambda_{abj-1} < \Delta\lambda_{avj}$ の場合は、前回と反対の方向の波面補正信号を波面補正器10に出力する(ステップ430)。

【0041】このように、スペクトル線幅が細くなる方向に波面補正器10を制御することにより、スペクトル線幅を最小にするようにしている。

【0042】なお、上記実施例では複数個のパルスのスペクトル線幅の平均値を比較するようにしたが、1ショット(1パルス)毎にスペクトル線幅を比較するようにしてもよい。

【0043】図5は、コントローラ18で行われる波面補正器10の他の制御手順を示すもので、この場合は単位スペクトル線幅当たりのパルスエネルギー $E_\lambda (=E/\Delta\lambda)$ が最大となるように波面補正器10を制御する

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

上記(1)式の両辺を $\lambda$ で微分して変形すると、下式(2)が得られる。

$$d\theta/d\lambda = (m \cdot \tan \theta) / (2 \cdot d \cdot \sin \theta) \quad \dots (2)$$

上記(1)式および(2)式から下記(3)式を得る。

$$d\theta/d\lambda = \tan \theta / \lambda \quad \dots (3)$$

ようにしている。

【0044】すなわち、モニタモジュール17のラインフォトセンサ16によって検出されるスペクトル線幅 $\Delta\lambda$ を1パルス毎にモニタし、これらモニタ値を使ってn個のパルス $P_i \sim P_{i+n}$ のスペクトル線幅 $\Delta\lambda_i \sim \Delta\lambda_{i+n}$ の平均値 $\Delta\lambda_{av}$ を求める。また、これと並行して、モニタモジュール17のフォトダイオード13の出力から出力レーザ光のパルスエネルギー値 $E_i$ を検出し、この検出値を使ってn個のパルス $P_i \sim P_{i+n}$ のパルスエネルギー値 $E_i \sim E_{i+n}$ の平均値 $E_{av}$ を求める。

【0045】そして、上記エネルギー値 $E_{av}$ をスペクトル線幅 $\Delta\lambda_{av}$ で除することにより、単位スペクトル線幅当たりのパルスエネルギー $E_\lambda (=E_{av}/\Delta\lambda_{av})$ を求める(ステップ500、510)。

【0046】そして、前回の演算値 $E_{\lambda j-1}$ と今回の演算値 $E_{\lambda j}$ を比較する(ステップ520)。

【0047】この比較の結果、 $E_{\lambda j} > E_{\lambda j-1}$ の場合は、前回と同じ方向の波面補正信号を波面補正器10に出力する。すなわち、前回凸面方向に波面を歪める波面補正信号を出力した場合は今回も凸面方向に波面を歪める波面補正信号を出力し、前回凹面方向に波面を歪める波面補正信号を出力した場合は今回も凹面方向に波面を歪める波面補正信号を出力する(ステップ530)。

【0048】一方、 $E_{\lambda j} \leq E_{\lambda j-1}$ の場合は、前回と反対の方向の波面補正信号を波面補正器10に出力する(ステップ540)。

【0049】このように、単位スペクトル線幅当たりのパルスエネルギー $E_\lambda$ が大きくなる方向に波面補正器10を制御することにより、単位スペクトル線幅当たりのパルスエネルギー $E_\lambda$ を最大にするようにしている。

【0050】なお、上記実施例では、単位スペクトル線幅当たりのパルスエネルギー $E_\lambda$ は複数個のパルスの平均値を用いるようにしたが、1ショット(1パルス)毎に単位スペクトル線幅当たりのパルスエネルギー $E_\lambda$ を求め、これを比較するようにしてもよい。

【0051】なお、各パルスの出力エネルギー $E_i$ を検出し、この出力エネルギー $E_i$ が最大となるように波面補正器を制御するようにしてもよい。

【0052】係る図1に示す構成において、グレーティング9に入射するレーザ光の波長を $\lambda$ 、その入射角度を $\theta$ 、グレーティングの溝間隔距離を $d$ としたときに回折光強度が最大になるのは、下式が成立するときである。

$$m \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad \dots (1)$$

【0054】

$$d\theta/d\lambda = \tan \theta / \lambda \quad \dots (3)$$

また、この(3)式から下記(4)式が成立する。

$$\Delta\lambda = (\lambda / \tan \theta) \cdot \Delta\theta$$

上記(4)式において、 $\Delta\lambda$ はスペクトル線幅、 $\Delta\theta$ はグレーティングに入射するレーザビームの拡がり角である。

【0057】ここで、ビームエキスパンダやグレーティングの波面収差を波面補正器10によって補正することは、上記(4)式の $\Delta\theta$ をほぼ零にするのと同じ効果があるので、これにより(4)式の左辺、すなわちスペクトル線幅 $\Delta\lambda$ を最小にすることができる。波面補正器10は、かかる波面収差を補正する光学ユニットである。

【0058】次に、図6～図20に波面補正器10の各種具体構成例を示す。

【0059】図6においては、波面補正器10は、凸レンズ20と、凹レンズ21と、凸レンズ20を光軸方向に移動させる移動ステージ22と、この移動ステージ22を駆動するパルスモータ23とによって構成するようにしており、入射された凸面波面または凹面波面を凸レンズ20と凹レンズ21との光軸方向の相対位置に応じて平面波に変換するようにしている。すなわち、図6(a)のように、凸レンズ20と凹レンズ21の距離を大きくとった場合は凸面波面を平面波に変換することができ、また図6(b)のように、凸レンズ20と凹レンズ21の距離を小さくとった場合は凹面波面を平面波に変換することができる。勿論、この図6の実施例において、凹レンズ22を移動可能にするようにしてもよい。

【0060】このようにこの第2の実施例では、凸レンズ20と凹レンズ21との相対距離を調整することで、レーザ光の波面の歪みを補正するようにしている。

【0061】図7は、上記図6に示した構成の波面補正器を10を用いてグレーティング9に波面収差が発生した場合に対処する具体例を示したものである。この場合は、グレーティングはその回折波面が凹面に歪む波面収差を持つとする。

【0062】狭帯域化モジュール6のビームエキスパンダ8に平面波で入射されたレーザ光は、2個のプリズム8a、8bによってビーム幅が拡大されてさらにその波面は凸波面に歪められる。波面補正器10では、その曲率半径がグレーティング9の波面収差による波面の曲率半径の2倍に一致する凸波面のレーザ光が波面補正器10からグレーティング9に出射されるようにレンズ20および21間の距離を調整しており、ビームエキスパンダ10から入射された凸波面のレーザ光の曲率半径を前述のように補正するよう動作する。

【0063】したがって、グレーティング9で回折されたレーザ光の波面は、グレーティング9に入射されたレーザ光の波面と全く同じになり、この結果、グレーティング9での回折光は波面補正器10およびビームエキスパンダ10を前記とは逆経路を通過することにより元の平面波に変換されて狭帯域化モジュール6を出射するこ

【0056】

…(4)

とになる。

【0064】このようにして、狭帯域化モジュール6内の光学素子で発生する波面収差を補正する。

【0065】なお、図6の実施例において、凸レンズ11の代わりにこれと同等の機能を有する光学素子、すなわちその透過波面が凹波面になる光学素子を用いるようにしてもよく、また凹レンズ12の代わりにこれと同等の機能を有する光学素子、すなわちその透過波面が凸波面になる光学素子を用いるようにしてもよい。

【0066】また、透過波面が凹面であるプリズムと透過波面が凸面であるプリズムとを組み合わせ、これらの両プリズムの相対距離を調整することができるようになれば、プリズムビームエキスパンダの機能と波面補正器の機能を兼用させることができる。

【0067】さらに、凹波面のプリズムエキスパンダと凸波面の凹レンズを組み合わせ、これらの光学素子の距離を調節するようにすれば、ビームエキスパンダと波面補正器とで、凹波面のプリズムエキスパンダを共用することができる。

【0068】図8は波面補正器10の他の具体構成例を示すもので、この場合は、凸面ミラー25または凹面ミラー26によって波面補正器10を構成するようにしている。すなわち、図8(a)に示すように、凸面ミラー25の場合は凹面の入射波を平面波に変換することができ、また図8(b)に示すように、凹面ミラー26の場合は凸面の入射波を平面波に変換する事ができる。

【0069】図9は、上記図8に示した凸面ミラー25による波面補正器を10を用いてグレーティング9に波面収差が発生した場合に対処する具体例を示したものであり、この場合は、グレーティング9はその回折波面が凸面に歪む波面収差を持つとする。また、この場合、波面補正器10(凸面ミラー25)は、ビームエキスパンダ10の2つのプリズム10a、10bの間に配設している。

【0070】狭帯域化モジュール6に平面波で入射されたレーザ光は、プリズム10aによってビーム幅が拡大されて凸面ミラー25に入射される。凸面ミラー25は、平面波である入射波を凹面波に変換してプリズム10bに出射する。プリズム10bは、入射波のビーム幅を更に拡大すると共に入射波を凸面波に変換してグレーティング9に出射する。

【0071】ただし、この際、グレーティング9に入射される凸面波の曲率半径がグレーティング9の波面収差による波面の曲率半径の2倍に一致するように、凸面ミラー25の曲率が調整されている。

【0072】したがって、グレーティング9で回折されたレーザ光の波面は、グレーティング9に入射されたレーザ光の波面と全く同じになり、この結果、グレーティ

ング9での回折光はプリズム10b、凸面ミラー25およびプリズム10aを前記とは逆経路を通過することにより元の平面波に変換されて狭帯域化モジュール6から出射することになる。

【0073】このようにして、狭帯域化モジュール6内の光学素子で発生する波面収差を補正する。

【0074】図10は、波面補正器10の他の具体構成例を示すものである。

【0075】図10においては、波面補正器10を透過型の光学素子基板の温度分布を制御することで実現する10ようにしている。

【0076】一般に、光学材料の屈折率は温度によって変化する。したがって、光学素子に温度分布を故意に与えることで屈折率分布を発生させることができる。特に、合成石英硝子は、熱膨張率は非常に小さいが、温度に対する屈折率の依存性が大きいために、歪み(複屈折)を発生させずに、透過波面の形状を制御することができる。

【0077】すなわち、図10(a)(b)に示すように、石英硝子基板30の四方の各側面に、熱電素子のような加熱および冷却が可能な加熱冷却器31a~31dを設置するとともに、これら加熱冷却器31a~31dが設置された付近の基板30の温度を温度センサ32a~32dで検出し、石英硝子基板30が所定の温度分布となるように温度センサ32a~32dの検出値に基づいて各加熱冷却器31a~31dを温度制御して、石英硝子基板15に所望の屈折率分布を与える。なお、図10(b)において、33はレーザビームが通過するエリアである。

【0078】これら石英硝子基板30の四方に配した加熱冷却器31a~31dおよび温度センサ32a~32dは、図11に示すように、温調器34a~34dに接続され、これら温調器34a~34dによって駆動される。温調器34a~34dは、先の図1に示したコントローラ18に接続され、コントローラ18からの温度指令信号によって加熱冷却器31a~31dを温度制御する。すなわち、コントローラ18においては、モニタモジュール17での各モニタ値等に基づいて先の図3~図5で説明したような演算を行って波面補正器10の波面補正信号を計算し、この波面補正信号に応じて加熱冷却器31a~31dでの設定温度を計算し、該計算した設定温度信号を温調器34a~34dに送るよう動作する。

【0079】例えば、この波面補正器10に入射されるレーザ光の波面が凸面の場合は、基板30の中央部の屈折率を高くし、端部の屈折率を低くするようにすれば、該波面補正器10を通過したレーザ光は平面波になるので、基板30の中央部に近い位置に配置されている加熱冷却器31b、31dの温度を低く設定するとともに、端部に配置されている加熱冷却器31a、31cの温度を高く設定するようにしている。また、これと逆の温度

設定を行う事により、凹面波面の入射波を平面波に変換することができる波面補正器を実現することができる。

【0080】なお、上記実施例において、加熱冷却器の個数およびその配置態様は任意である。例えば、図12に示すように、石英硝子基板30の側面に多数(この場合は8個)の加熱冷却器31a~31hおよび温度センサ32a~32hを配置するようにすれば、より高精度に基板の温度分布ひいては屈折率分布を制御することができ、単純な凹面又は凸面波面ばかりでなく2山を有する波面のような場合でもその波面の補正が可能になる。なお、図10(c)に示すように、プリズムビームエキスパンダに加熱冷却器を設けて前記同様に波面を制御するようにしてもよい。

【0081】図13は、波面補正器10のさらに他の構成例を示すものである。

【0082】図13においては、反射型の光学素子基板の温度分布を制御することで基板の熱膨張量を調整して反射型の光学素子基板の表面を凹面又は凸面に屈曲させるようにしている。

【0083】すなわち、図13(a)(b)に示すように、所定の熱膨張率のガラス基板からなる反射ミラー40の底面および側面に、熱電素子のような加熱および冷却が可能な加熱冷却器41a~41cを設置するとともに、これら加熱冷却器41a~41cが設置された付近に温度センサ42a~42cを配置する。

【0084】また、図14に示すように、これら加熱冷却器41a~41cおよび温度センサ42a~42cを温調器43a~43cに接続し、各加熱冷却器41a~41cを、先の図11及び図12に示す実施例と同様に、温調器43a~43cを介してコントローラ18によって制御する。

【0085】例えば、この波面補正器10に入射されるレーザ光の波面が凸面の場合は、反射ミラー40を凹面ミラーにすればその反射波面は平面波になるので、基板40の中央部の底面に配置された加熱冷却器41cの設定温度を低くするとともに、基板40の端部に配置されている加熱冷却器41a、41bの温度を高く設定することで、基板中央部を凹ましかつ基板端部の厚さを厚くして、所望の曲率の凹面ミラーを形成する。また、これと逆の温度設定を行う事により、凸面ミラーを形成することができる。

【0086】なお、上記実施例において、加熱冷却器の個数やその配置態様は任意である。例えば、図15に示すように、石英硝子基板30の底面に多数(この場合は3個)の加熱冷却器41a~41eおよび温度センサ42a~42eを配置するようにすれば、より高精度に基板の温度分布ひいては熱膨張量分布を制御することができ、より複雑な形状をもつ入射波面の補正が可能になる。

【0087】図16は、波面補正器10のさらに他の構

成例を示すものである。

【0088】図16においては、反射型の光学素子基板に実際に物理的力を加えて反射面を歪ませるようにしている。図16(a)は曲げ前の状態を示す正面図、同図(b)は平面図、同図(c)は曲げ後の状態を示す正面図である。

【0089】すなわち、この実施例においては、反射ミラー基板50の背面を3本の支持柱51～53で支持すると共に、基板50の背面の中央部に高さ方向に伸縮する伸縮アクチュエータ54を設けるようにする。3本の支持柱51～53および伸縮アクチュエータ54は支持板55に固定されている。

【0090】伸縮アクチュエータ54としては、圧電素子（ピエゾ素子）や熱によって伸縮する金属片または樹脂片などを用いる。

【0091】図16(c)においては、伸縮アクチュエータ54を縮退させて凹面ミラーを形成するようにしている。伸縮アクチュエータ54を伸張させれば、凸面ミラーを形成することができる。

【0092】なお、上記図16の実施例において、反射ミラー50の中央部に配設される伸縮アクチュエータ54を伸縮不可能な固定長部材とし、反射ミラーの端部に配設される部材51～53を伸縮可能な伸縮部材とするようにしてもよい。

【0093】また、反射ミラー50の中央部および端部に配設される全ての支持部材を伸縮自在な伸縮アクチュエータとするようにしてもよい。この場合、端部に配置される伸縮アクチュエータと、中央部に配設される伸縮アクチュエータの伸縮方向を逆にすれば、中央部または端部の一方のみに伸縮アクチュエータを備えた構成と同じ曲率を反射ミラーに与えようとした場合、伸縮アクチュエータの伸縮長は半分で済む。すなわちこの場合、ミラーに与えることができる曲率の可変範囲が倍になる。

【0094】図17は、上記図16の伸縮アクチュエータ54をネジ部材56で構成するようにしている。すなわち、この場合、支持板55の中央部にネジ山が形成された孔57を形成し、この孔57にネジ部材56を螺合するとともに、このネジ部材56の先端を接合部材58を介して反射ミラー50の背面に固定するようにしており、ネジ部材56の回転により反射ミラー50の中央部と支持板55との間隔を可変して、反射ミラー50を凹面または凸面に曲げるようにしている。

【0095】図18は図16の変形例であり、反射ミラー50の両端を支持部材59、60に形成した凹部61に係合させて、これら凹部61で反射ミラー50の両端を支持するとともに、反射ミラー50の中央付近に設けた伸縮アクチュエータ54の伸縮によってミラー反射面を凹面または凸面に曲げるようにしている。

【0096】図19は、波面補正器10のさらに他の構成例を示すものである。

【0097】図19においては、反射ミラー70の背面と支持板73との間に複数の圧電素子71a～71cを配設し、これら複数の圧電素子71a～71cの伸縮量を制御して、反射ミラー70に実際に物理的力を加えて反射面を歪ませるようにしている。また、支持板73上に複数の変位センサ72a～72cを設け、これら複数の変位センサ72a～72cによって各変位センサ72a～72cから反射ミラー70までの間隙の距離を測定するようにしている。間隙の距離を測定する変位センサ72としては、例えば静電容量式変位計を用いるようにする。

【0098】また、図20に示すように、これら圧電素子71a～71cおよび変位センサ72a～72cを変位制御器74a～74cに接続し、各圧電素子71a～71cを、先の図11及び図12に示す実施例と同様に、変位制御器74a～74cを介してコントローラ18によって制御する。

【0099】ところで、図1の実施例では、波面補正器10は、ビームエキスパンダ8とレーザチャンバ2との間に配設するようにしたが、図21に示すように、ビームエキスパンダ8とグレーティング9との間に配置するようにしてよいし、また図22に示すように、2つに分離したビームエキスパンダ8a、8b間に配設するようにしてもよい。

【0100】更に、図24に示すような発振増幅型の共振器構造のエキシマレーザの狭帯域化モジュール6に波面補正器10を配設するようにしてもよい。

【0101】すなわち、図24の共振器構造においては、レーザチャンバ2から発生されたレーザ光は有孔ミラー75の孔部を通過してビームエキスパンダ8に入射され、ここでビーム幅が拡大された後、波面補正器で10で波面が補正されてグレーティング9に入射される。このグレーティング9で波長選択された回折光は、波面補正器10、ビームエキスパンダ8、有孔ミラー75の孔部を経由してレーザチャンバ2に入射され、ここでさらに増幅された後、全反射ミラー76、レーザチャンバ2を経由して有孔ミラー75に入射される。有孔ミラー75に入射された光の一部はここで反射して出力光として取り出されると共に、孔部を介して狭帯域化ユニット6に再入射される。

【0102】また、本発明は、偏光結合型共振器、インジェクションロック式、不安定共振器などの他の共振器構造に適用するようにしてもよい。

【0103】また、図1の実施例では、波長選択光学素子として、リトロ配置のグレーティング9を採用するようにしたが、これの代わりに、分散プリズムとリアミラーの組み合わせ、エタロンとリアミラーの組み合わせ、あるいは斜入射配置のグレーティングとリアミラーの組み合わせを採用するようにしてもよい。また、ビームエキスパンダ8を省略するようにしてもよい。また、波面補



正器 10 は 1 個に限らず、レーザチャンバと波長選択素子の間に何個配置するようにしても良い。

【図面の簡単な説明】

【図 1】この発明の実施例を示す図。

【図 2】グレーティングの回転による波長制御手順を示すフローチャート。

【図 3】コンパクションによる波面歪みの補正手順を示すフローチャート。

【図 4】スペクトル線幅を最小にする波面補正手順を示すフローチャート。

【図 5】単位スペクトル線幅当たりの出力エネルギーを最大する波面補正手順を示すフローチャート。

【図 6】波面補正器の一例を示す図。

【図 7】図 6 の波面補正器を狭帯域化モジュールに配置した一例を示す図。

【図 8】波面補正器の他の例を示す図。

【図 9】図 8 の波面補正器を狭帯域化モジュールに配置した一例を示す図。

【図 10】波面補正器の他の例を示す図。

【図 11】図 10 の波面補正器の制御構成例を示す図。

【図 12】図 10 の波面補正器の変形例を示す図。

【図 13】波面補正器の他の例を示す図。

【図 14】図 13 の波面補正器の制御構成例を示す図。

【図 15】図 13 の波面補正器の変形例を示す図。

【図 16】波面補正器の他の例を示す図。

【図 17】波面補正器の更に他の例を示す図。

【図 18】波面補正器の更に他の例を示す図。

【図 19】波面補正器の更に他の例を示す図。

【図 20】図 19 の波面補正器の制御構成例を示す図。

【図 21】狭帯域化モジュールへの波面補正器の他の配置例を示す図。

【図 22】狭帯域化モジュールへの波面補正器の更に他の配置例を示す図。

【図 23】他の共振器構造に本発明を適用した構成を示す図。

【図 24】従来技術を示す図。

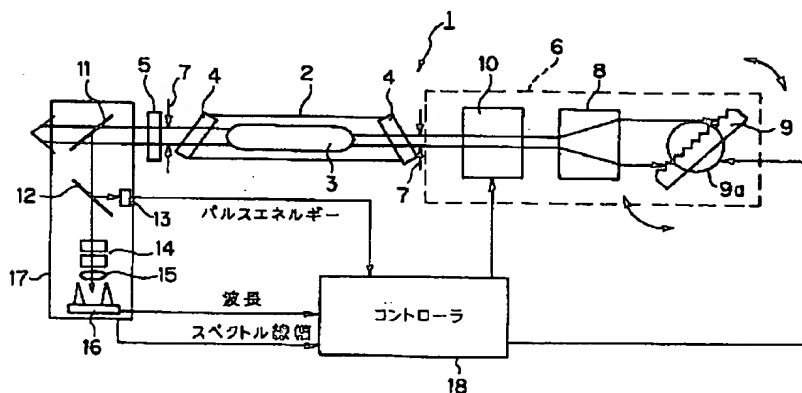
【図 25】従来技術を示す図。

【図 26】従来技術のグレーティングを示す図。

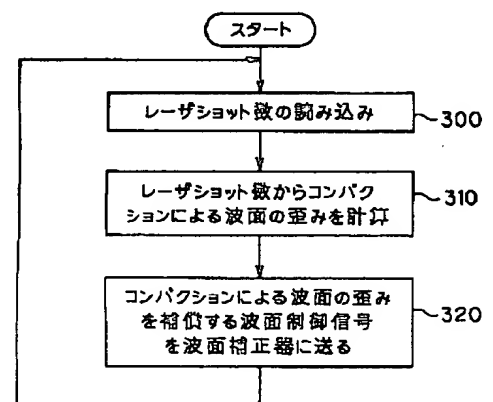
【符号の説明】

1…エキシマレーザ装置 2…レーザチャンバ 3…放電電極  
4…ウィンドウ 5…出力ミラー 6…狭帯域化モジュール  
7…スリット 8…ビームエキスパンダ 9…グレーティング  
10…波面補正器 11, 12…ビームスプリッタ  
13…フォトダイオード 14…エタロン 15…対物レンズ  
16…ラインセンサ 17…モニタモジュール 18…コントローラ  
20…移動ステージ 21…凹レンズ 22…凸面ミラー  
23…モータ 25…凸面ミラー 26…凹面ミラー  
30…石英ガラス基板 31, 41…加熱冷却器  
32, 42…温度センサ 34, 43…温調器  
40, 50, 70…反射ミラー 51~53…支持柱  
54…伸縮アクチュエータ 55…支持板 56…ネジ部材  
57…孔 58…接合部材 59, 60…支持部材板  
61…凹部 61, 73…支持板 71…圧電素子  
72…変位センサ 74…変位制御器 75…有孔ミラー  
76…全反射ミラー

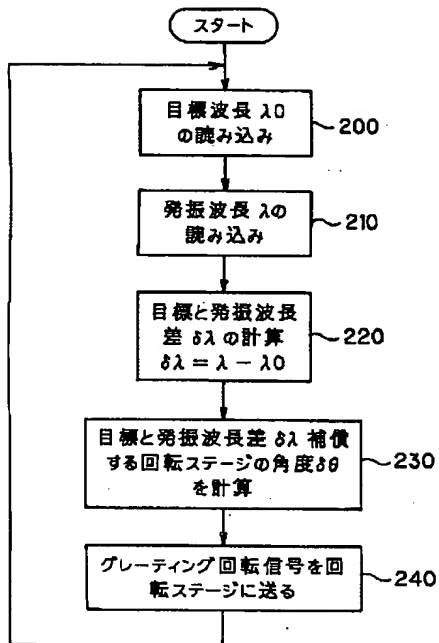
【図 1】



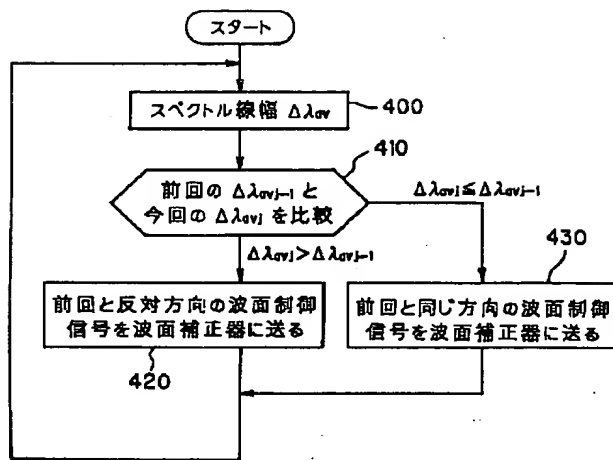
【図 3】



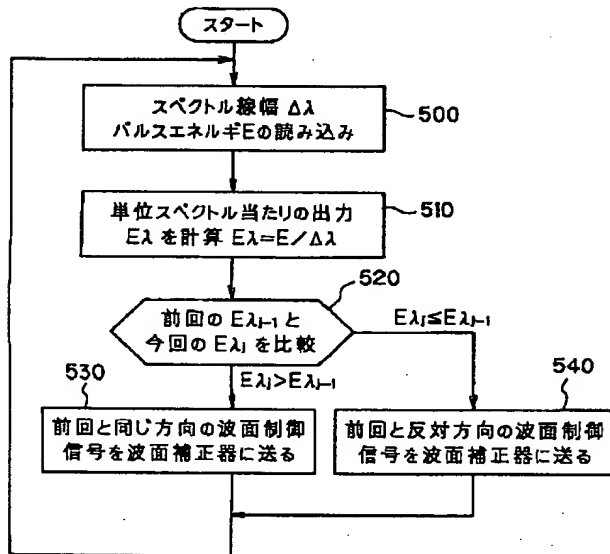
【図 2】



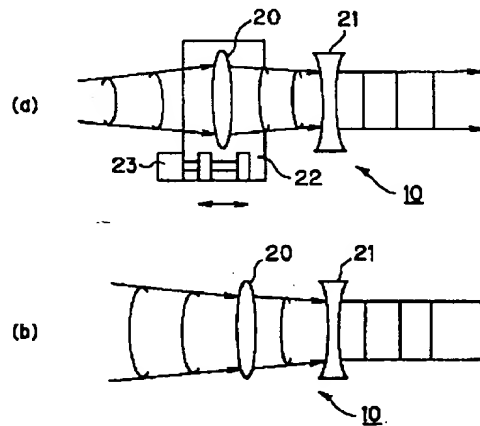
【図 4】



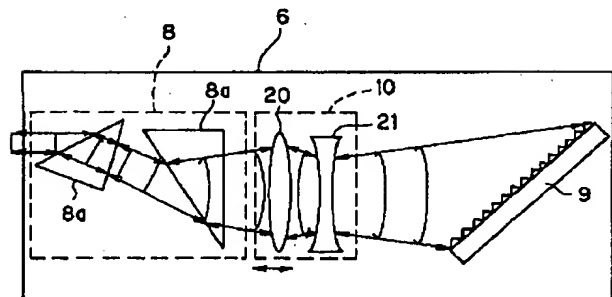
【図 5】



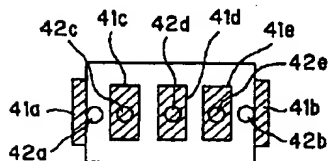
【図 6】



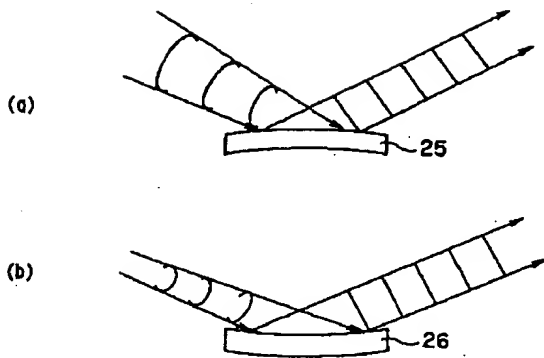
【図 7】



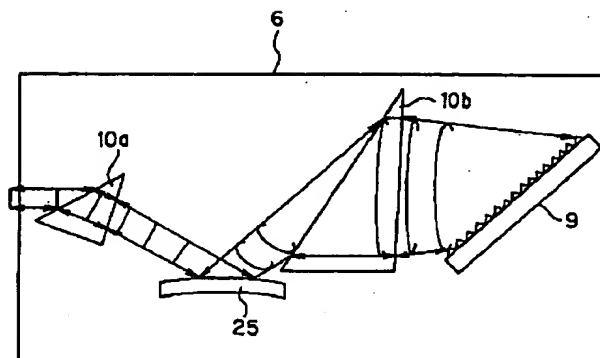
【図 15】



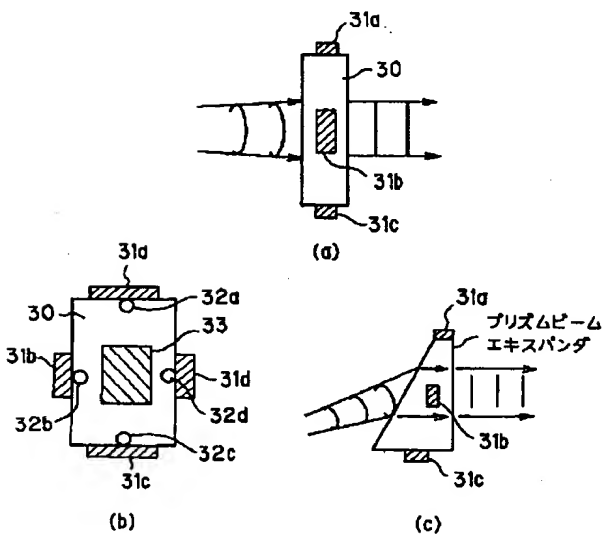
【図 8】



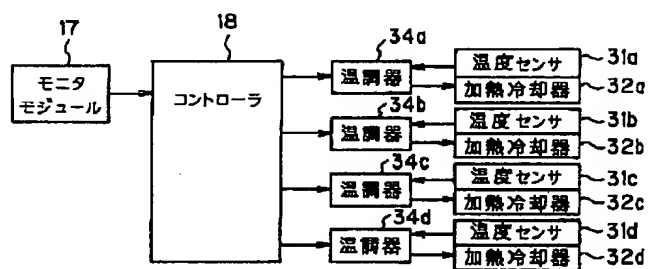
【図 9】



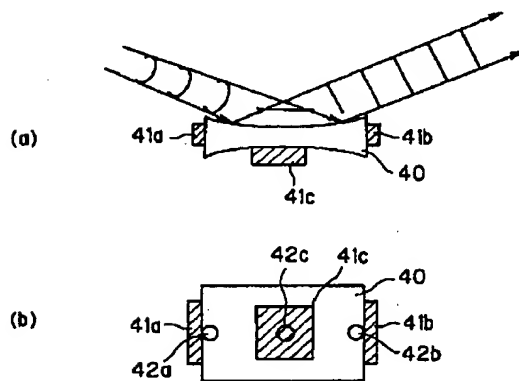
【図 10】



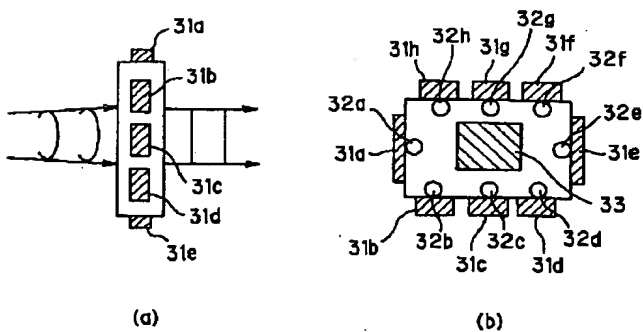
【図 11】



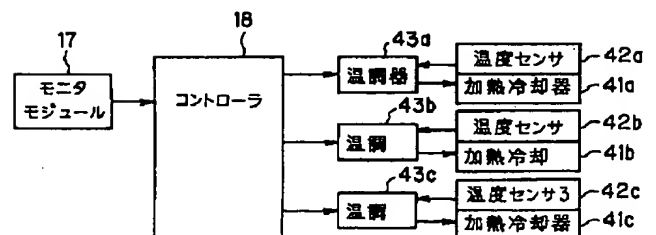
【図 13】



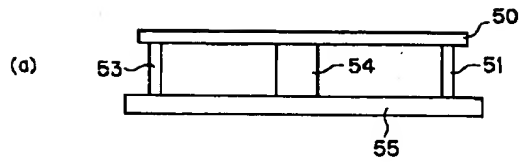
【図 12】



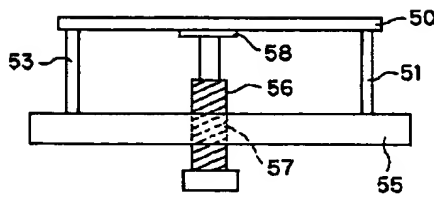
【図 14】



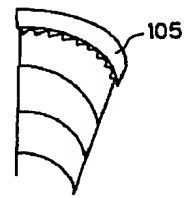
【図 16】



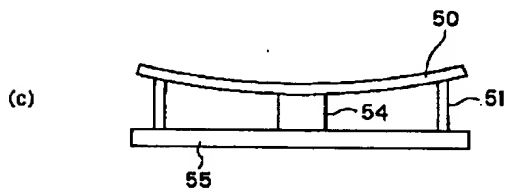
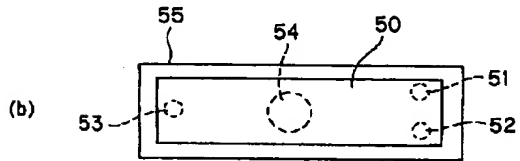
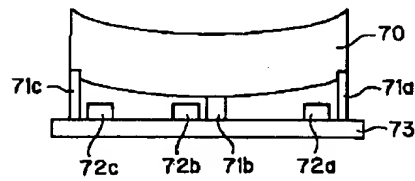
【図 17】



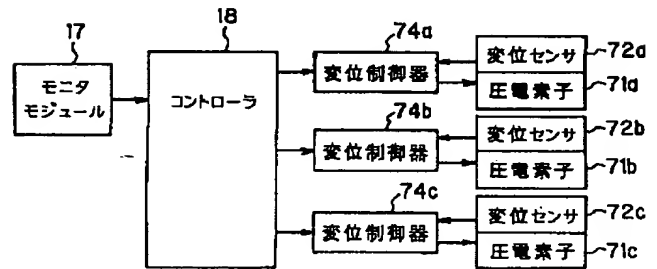
【図 26】



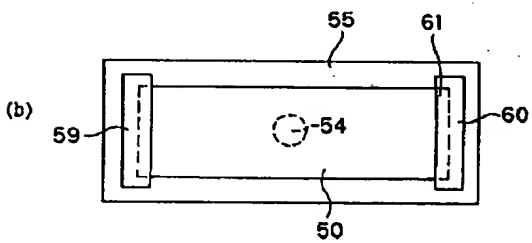
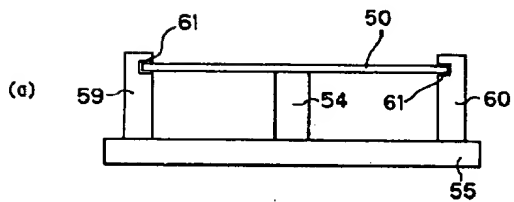
【図 19】



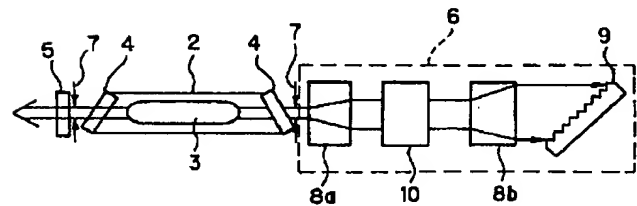
【図 20】



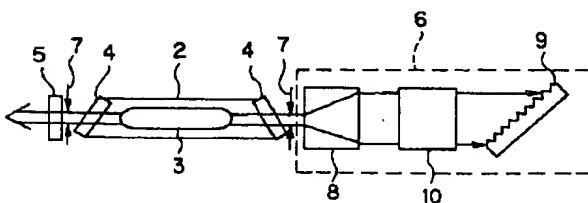
【図 18】



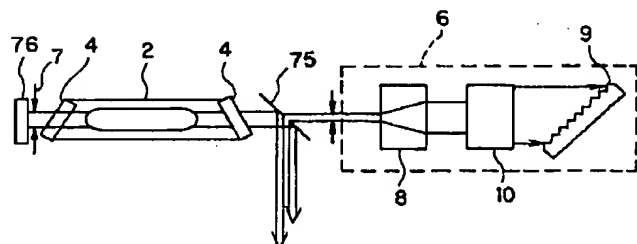
【図 22】



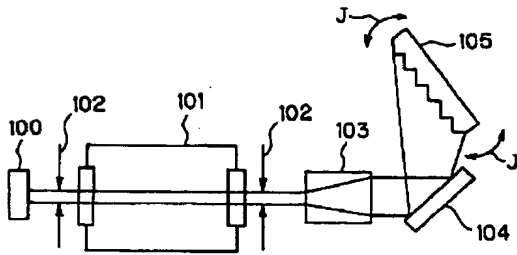
【図 21】



【図 23】



【図 24】



【図 25】

